

SISTEMA FOTOVOLTAICO OFF-GRID PARA AERAÇÃO NA CARCINICULTURA DE PEQUENA ESCALA EM SERGIPE: UMA ABORDAGEM DE TECNOLOGIA SOCIAL

OFF-GRID PHOTOVOLTAIC SYSTEM FOR AERATION IN SMALL-SCALE SHRIMP FARMING IN SERGIPE: A SOCIAL TECHNOLOGY APPROACH

 <https://doi.org/10.63330/aurumpub.071-003>

Hugo dos Santos

Graduando em Engenharia Eletrônica pela Universidade Federal de Sergipe
E-mail: hugo1995@academico.ufs.br

Mário Cupertino da Silva Júnior

Doutor em Engenharia Agrícola
Professor Associado na Universidade Federal de Sergipe
E-mail: mariocupertino@academico.ufs.br

Adson Andrade Barros

Graduado em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Sergipe
Mestrando em Desenvolvimento e Meio Ambiente na Universidade Federal de Sergipe
E-mail: adsonandrade.agro@gmail.com

Antony Albuquerque Marques Nascimento

Graduando em Engenharia de Pesca pela Universidade Federal de Sergipe
E-mail: antonyaamn3@gmail.com

Áquila Moura Silva

Graduando em Engenharia de Pesca pela Universidade Federal de Sergipe
E-mail: aquilamsilva@gmail.com

Edenilce de Fátima Ferreira Martins

Doutora em Zootecnia
Consultora Técnica da CODEVASF
E-mail: edenilcemartinsaquapeq@gmail.com

Ernesto de Carvalho Domingues

Doutor em Oceanografia
Professor Associado na Universidade Federal de Sergipe
E-mail: ernestocd@academico.ufs.br

Crislayne de Souza Bery

Graduada em Engenharia de Pesca pela Universidade Federal de Sergipe
Mestre em Zootecnia pela Universidade Federal de Sergipe
Responsável Técnica da Piscicultura no SENAR e na Prefeitura de Nossa Senhora do Socorro-SE
E-mail: laybery@hotmail.com

Manoel de Santana de Campos

Graduado em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Sergipe
Mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente pela Universidade Federal de Sergipe
E-mail: engenheiromanoelcampos@gmail.com

Lusivaldo Luiz dos Santos

Mestre em Recursos Hídricos
Doutorando em Desenvolvimento e Meio Ambiente pela Universidade Federal de Sergipe
E-mail: Lusivaldosantos97@gmail.com

Resumo

A carcinicultura marinha no estado de Sergipe enfrenta desafios operacionais devido ao elevado custo da energia elétrica e às interrupções no fornecimento durante a aeração noturna crítica. Este trabalho avalia o desenvolvimento, o dimensionamento elétrico e o desempenho de campo de um Sistema de Energia Solar Fotovoltaica Off-Grid (SESOG) aplicado ao acionamento de um aerador chafariz de 1,0 CV em um viveiro de camarão no município de Nossa Senhora do Socorro (SE). A metodologia compreendeu a caracterização da carga, o dimensionamento do gerador fotovoltaico (2.220 Wp) e do banco de baterias de Lítio Ferro Fosfato (LiFePO₄, 48 V / 100 Ah), além da parametrização de um inversor de frequência operando a 45 Hz para otimização do consumo energético. Os resultados operacionais demonstraram que o sistema assegurou 4 horas ininterruptas de aeração noturna (das 01h00min às 05h00min), apresentando uma redução superior a 40% na demanda de potência ativa devido à redução de frequência, com temperatura estatórica estabilizada em 55 °C. A divergência em relação à autonomia teórica de 5 horas decorreu de perdas de conversão e do ponto de corte por subtensão (47,2 V) programado para proteção da bateria. Conclui-se que o SESOG tem potencial para se consolidar como uma Tecnologia Social útil, para pequenos carcinicultores, proporcionando autonomia energética e sustentabilidade ambiental, recomendando-se a expansão para três baterias para cobrir integralmente o ciclo noturno.

Palavras-chave: Aeração Noturna; Carcinicultura; Energia Solar Off-Grid; Sergipe; Tecnologia Social.

Abstract

Marine shrimp farming in the state of Sergipe faces operational challenges due to high electricity costs and supply interruptions during critical nighttime aeration. This study evaluates the development, electrical sizing, and field performance of an off-grid photovoltaic solar energy system (SESOG) used to power a 1.0 hp fountain-type aerator at a shrimp farm in the municipality of Nossa Senhora do Socorro (SE). The methodology involved load characterization, sizing of the photovoltaic generator (2,220 Wp) and the lithium iron phosphate (LiFePO₄, 48 V / 100 Ah) battery bank, and the parameterization of a variable frequency drive operating at 45 Hz to optimize energy consumption. Operational results demonstrated that

the system ensured 4 hours of uninterrupted nighttime aeration (from 01:00 to 05:00), showing a reduction of over 40% in active power demand due to the frequency reduction, with the stator temperature stabilized at 55°C. The discrepancy regarding the theoretical 5-hour autonomy resulted from conversion losses and the undervoltage cutoff point (47.2 V) programmed for battery protection. It is concluded that the SESOG has the potential to establish itself as a useful social technology for small-scale shrimp farmers, providing energy autonomy and environmental sustainability; expanding the system to three batteries is recommended to fully cover the nighttime cycle.

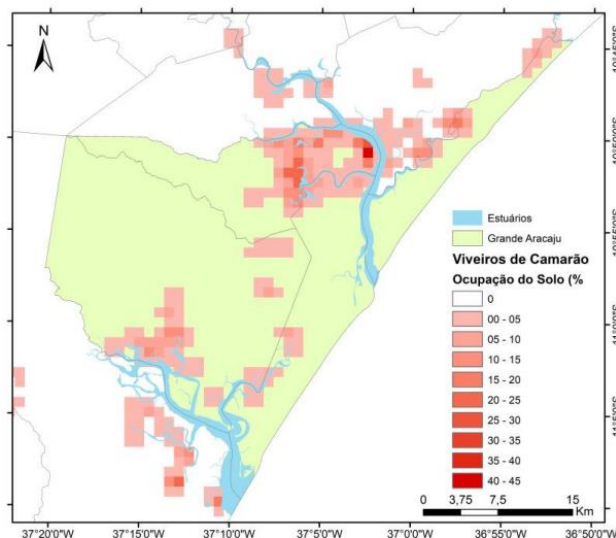
Keywords: Night Aeration; Off-Grid Solar Energy; Sergipe; Shrimp Farming; Social Technology.

1 INTRODUÇÃO

A carcinicultura marinha consolida-se como uma das atividades agropecuárias de maior relevância socioeconômica no Nordeste brasileiro, região que responde por mais de 99% da produção nacional de camarões cultivados em cativeiro (Simões et al., 2024), com amplo predomínio da espécie *Litopenaeus vannamei* devido à sua elevada adaptabilidade e rápido crescimento (Cavalheiro et al., 2016). No estado de Sergipe, a criação de camarão apresentou uma expansão acelerada nas últimas décadas, impulsionada por marcos regulatórios e parcerias institucionais (ABCC, 2022), evoluindo de uma atividade incipiente para um vetor estratégico de geração de emprego e renda, movimentando dezenas de milhões de reais anualmente ao longo da zona costeira (Souza et al., 2022).

Entre os municípios sergipanos, Nossa Senhora do Socorro destaca-se como o principal polo produtivo do estado (Souza et al., 2022). Localizado na Bacia Hidrográfica do Rio Sergipe, a qual concentra 54,23% dos viveiros de carcinicultura do território sergipano, o município abrange uma área cultivada de aproximadamente 434,94 hectares distribuídos em 825 viveiros, movimentando cerca de 22% do valor total da produção carcinicultora estadual (Souza et al., 2022). Além do expressivo impacto econômico, a atividade possui um forte viés social na Região Metropolitana de Aracaju, sendo frequentemente desenvolvida no entorno de aglomerados subnormais como alternativa de subsistência e complementação de renda para famílias em situação de vulnerabilidade (Souza et al., 2022).

Figura 1. Mapeamento da concentração de viveiros de carcinicultura em regiões da grande Aracaju-SE.



Fonte: Souza et al. (2022)

Apesar do elevado potencial produtivo, a carciniculturasemi-intensiva e intensiva enfrenta gargalos operacionais e ambientais críticos. O manejo da qualidade da água, em especial o controle da concentração de oxigênio dissolvido (OD), constitui o fator mais determinante para a sobrevivência e a conversão alimentar dos crustáceos (Cavalheiro et al., 2016). Durante o período noturno, com a interrupção da fotossíntese realizada pelas microalgas, ocorre uma acentuada queda nos níveis de OD, uma vez que o fitoplâncton e a microbiota decompositora passam a competir diretamente com os camarões pelo oxigênio disponível no fundo do viveiro (Cavalheiro et al., 2016). Para evitar episódios de anoxia e mortalidade severa do lote, faz-se indispensável o uso contínuo de aeradores mecânicos durante a madrugada (Cavalheiro et al., 2016).

Entretanto, o acionamento diário desses equipamentos demanda um consumo expressivo de eletricidade, alcançando a fatura energética ao posto de um dos maiores custos fixos da produção aquícola (Despesca, 2023; Souza, 2022). Em propriedades rurais periféricas ou isoladas da rede concessionária, os pequenos produtores enfrentam duas barreiras severas: o custo crescente das tarifas elétricas e a constante instabilidade no fornecimento, cuja interrupção não programada durante a noite pode ocasionar a perda total da produção em poucas horas (Despesca, 2023).

Nesse cenário, a transição para fontes renováveis, com ênfase no Sistema de Energia Solar Fotovoltaica Isolado ou Off-Grid (SESOG), surge como uma solução sustentável para a descarbonização e a autonomia energética dos viveiros (SelesNafes, 2023; Simões et al., 2024). O Nordeste brasileiro apresenta índices excepcionais de irradiação solar, como verificado no município de Nossa Senhora do Socorro (SE), que dispõe de uma Média de Horas de Sol Pleno (HSP) de 5,42 kWh/m²/dia. A utilização do SESOG equipado com armazenamento em baterias viabiliza o fornecimento de eletricidade para a aeração noturna sem dependência da rede elétrica convencional ou de geradores a combustível fóssil (Souza, 2022).

Para além da eficiência técnica e econômica, a implementação do SESOG na carcinicultura familiar fundamenta-se nos princípios da Tecnologia Social (TS) e da Adequação Sociotécnica (AST). Sob o referencial analítico de Dagnino (2010), a Tecnologia Social contrapõe-se às tecnologias convencionais de mercado ao propor soluções acessíveis, de baixo impacto ambiental, adaptadas às reais necessidades socioeconômicas locais e voltadas à emancipação de pequenos produtores rurais. A adequação sociotécnica do sistema fotovoltaico reduz a vulnerabilidade dos carcinicultores, barateia os custos operacionais e democratiza o acesso a inovações sustentáveis no campo (Dagnino, 2010).

Diante dessa perspectiva, este texto apresenta o desenvolvimento, o dimensionamento elétrico, a montagem prática e a avaliação operacional de um Sistema de Energia Solar Fotovoltaica Off-Grid projetado para alimentar um aerador chafariz de 1,0 CV em um viveiro de camarão em Nossa Senhora do Socorro (SE). O trabalho foi fruto de um projeto de pesquisa e inovação tecnológica apoiado pela Fundação de Apoio à Pesquisa e à Inovação Tecnológica do Estado de Sergipe (FAPITEC/SE) em parceria com a Universidade Federal de Sergipe (UFS).

O objetivo principal foi apresentar os desafios práticos da aplicação do SESOG como Tecnologia Social na carcinicultura de pequena escala, analisando o comportamento dos módulos fotovoltaicos monocristalinos, do inversor híbrido, do banco de baterias de lítio (LiFePO₄) e do inversor de frequência sob condições reais de campo (Dagnino, 2010).

2 METODOLOGIA

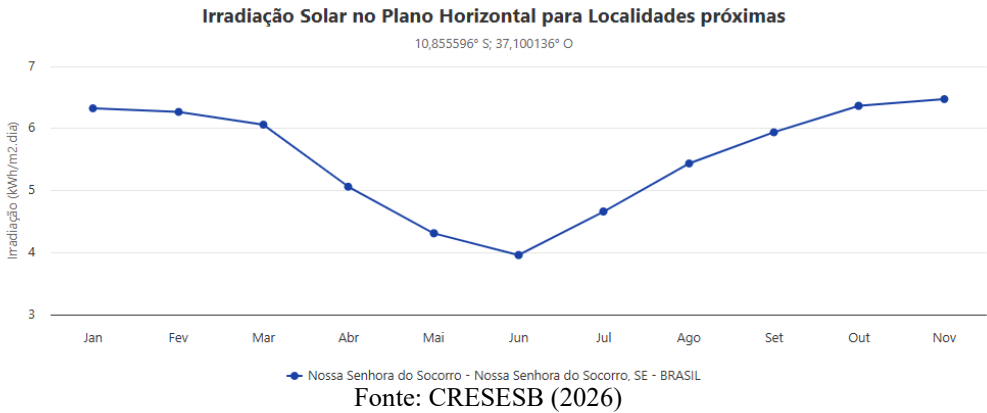
A metodologia deste estudo fundamenta-se em uma abordagem quantitativa e aplicada, estruturada em quatro etapas principais: (i) caracterização da área experimental e levantamento da demanda energética da carga; (ii) dimensionamento teórico do gerador fotovoltaico e do banco de baterias; (iii) seleção e especificação dos equipamentos de potência e controle; e (iv) dimensionamento das proteções elétricas, automação e protocolo de acionamento do aerador em campo.

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL E LEVANTAMENTO DA CARGA

O projeto foi executado em uma fazenda de cultivo de camarão marinho (*Litopenaeus vannamei*) situada no município de Nossa Senhora do Socorro, Sergipe, inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Sergipe. O município apresenta índices favoráveis para o aproveitamento da energia solar, com uma Irradiação Solar Média Diária (Horas de Sol Pleno – HSP) de 5,41 kWh/m²/dia no plano de inclinação do painel, conforme dados obtidos junto ao Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (Figura 2) (CRESESB, 2026).

Figura 2. Índice de Irradiação solar domunicípio de Nossa Senhora do Socorro

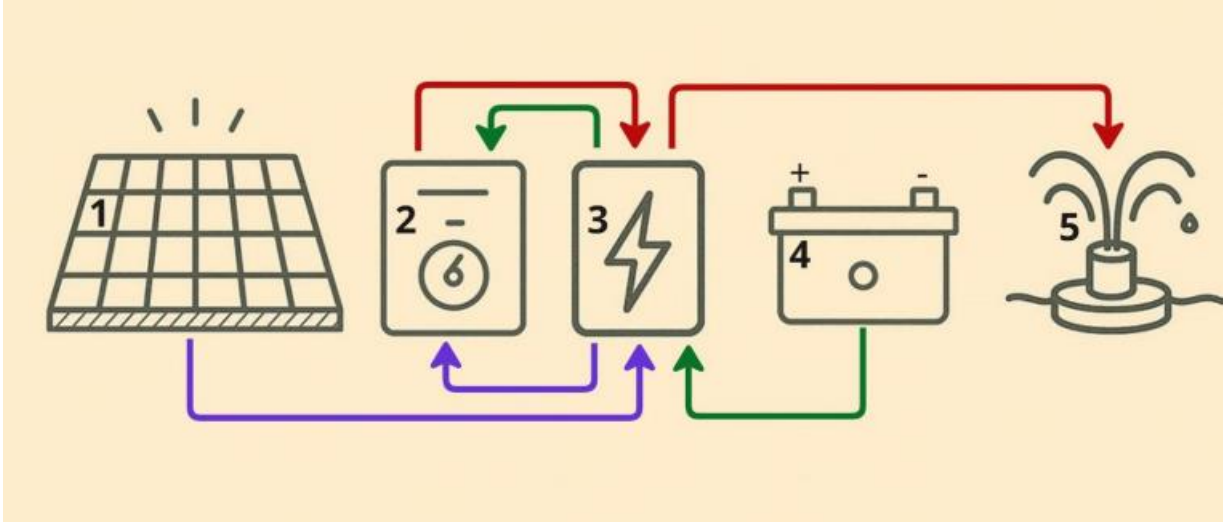
			Irradiação solar diária média [kWh/m².dia]																			
#	Estação	Município	UF	País	Latitude [°]	Longitude [°]	Distância [km]	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta	
☒	Nossa Senhora do Socorro	Nossa Senhora do Socorro	SE	BRASIL	10,9° S	37,149° O		7,3	6,32	6,27	6,06	5,06	4,31	3,96	4,04	4,66	5,44	5,94	6,36	6,47	5,41	2,51
☐	Aracaju	Aracaju	SE	BRASIL	10,9° S	37,049° O		7,5	6,28	6,38	6,08	5,09	4,43	4,07	4,19	4,83	5,59	6,07	6,36	6,58	5,50	2,52
☐	Laranjeiras	Laranjeiras	SE	BRASIL	10,801° S	37,149° O		8,1	6,34	6,17	6,06	5,08	4,33	3,94	4,09	4,61	5,43	5,85	6,34	6,42	5,39	2,48



A carga selecionada para o acionamento pelo SESOG consiste em um aerador mecânico do tipo chafariz de 1,0 CV (potência nominal de 0,75 kW), acionado por um motor elétrico assíncrono trifásico da marca SEW-Eurodrive (modelo DRN80M4/FT, 220/380 V, 60 Hz, 1751 RPM e fator de potência de 0,70). A função principal desse equipamento é promover a oxigenação da lâmina d'água e a mistura térmica no viveiro durante a madrugada.

O arranjo esquemático geral do sistema fotovoltaico isolado e sua interconexão com os componentes de armazenamento e carga são ilustrados na Figura 3.

Figura 3. Diagrama esquemático do Sistema de Energia Solar Fotovoltaica Off-Grid (SESOG) para aeração na carcinicultura.



Fonte: Autoria própria (2025)

2.2 DIMENSIONAMENTO TEÓRICO DO GERADOR FOTOVOLTAICO E BANCO DE BATERIAS

O dimensionamento elétrico do SESOG seguiu as diretrizes metodológicas do CEPEL/CRESESB (2014) e Villalva e Gazoli (2012), ajustadas para cargas indutivas com armazenamento eletroquímico.

2.2.1 Cálculo do Consumo Corrigido e Potência do Gerador Fotovoltaico

O consumo diário de energia elétrica em corrente alternada (CA) foi estipulado considerando o funcionamento do aerador de 1,0 CV ($P_{\text{carga}}=750 \text{ W}$) por um período projetado de 5 horas noturnas de autonomia ($t = 5\text{h}/\text{dia}$):

$$CA = P \times t = 750\text{W} \times 5 \frac{\text{h}}{\text{dia}} \approx 3750\text{Wh}/\text{dia}$$

Para determinar a energia corrigida (C_{correg}) exigida do gerador fotovoltaico, incorporaram-se as eficiências globais de recarga da bateria de lítio ($n_{\text{bat}}=98\%$) e de conversão do inversor híbrido ($n_{\text{inv}}=92\%$), conforme especificações dos fabricantes (SRNE, 2024; Unipower, 2024):

$$C_{\text{correg}} = \frac{CA}{n_{\text{bat}} \times n_{\text{inv}}} = \frac{3750 \left(\frac{\text{Wh}}{\text{dia}} \right)}{0,98 \times 0,92} = 4159,3 \text{ Wh}/\text{dia}$$

A potência pico necessária para o arranjo fotovoltaico (P_{FV}) foi calculada considerando o índice irradiação HSP = 5,42 kWh/m²/dia e um fator de redução/derating ($FS = 0,80$) referente a perdas por sujeira, temperatura e condutores (CEPEL/CRESESB, 2014):

$$P_{\text{FV}} = \frac{C_{\text{correg}}}{\text{HSP} \times FS} = \frac{4159,3 \left(\frac{\text{Wh}}{\text{dia}} \right)}{5,42 \text{ h}/\text{dia} \times 0,80} = 959,26 \text{ Wp}$$

Para garantir a máxima eficiência no processo de carga do banco de baterias sob variações de nebulosidade e acelerar a recuperação da autonomia diária, optou-se por utilizar um gerador superdimensionado composto por 4 módulos fotovoltaicos de 555 Wp, totalizando uma potência instalada de 2.220 Wp. Os módulos fotovoltaicos instalados na borda do viveiro podem ser visualizados na Figura 4.

Figura 4. Arranjo dos módulos fotovoltaicos monocristalinos instalados na margem do viveiro de camarão em Nossa Senhora do Socorro (SE).



Fonte: Autoria própria (2025)

Os módulos adotados foram da fabricante RenéSolar (modelo RS6-555M-E3), cujas características elétricas sob Condições Padrão de Ensaio (STC: Irradiância de 1000W/m², 25°C, AM 1.5) são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros elétricos dos módulos fotovoltaicos RenéSolar RS6-555M-E3 sob STC.

Parâmetro Elétrico	Valor Nominal
Potência Máxima	555 wp
Tensão em Potência Máxima V	42,10 V
Corrente em Potência Máxima	13,19 A
Tensão de Circuito Aberto	49,95 V
Corrente de Curto-Circuito	14,04 A
Eficiência do Módulo	21,48 %

Fonte: RenéSolar (2024)

Os 4 módulos foram conectados na configuração 2s2p (dois arranjos em série conectados em paralelo), resultando em uma tensão máxima de operação no barramento CC de $V_{mp_arr} \approx 84,20$ V e corrente de $I_{mp_arr} \approx 26,38$ A, adequando-se perfeitamente à faixa de entrada MPPT do inversor híbrido (60–115 Vdc).

2.2.2 Dimensionamento do Banco de Baterias

A capacidade requerida do banco de baterias em Ampère-hora (C_{Ah}) foi dimensionada considerando a energia corrigida solicitada pelas cargas ($C_{correg} = 4.159,3$ Wh/dia), tensão nominal de operação do barramento em $V_{cc} = 48$ V, profundidade máxima de descarga permitida de $DoD = 80\%$ (0,80) e um dia de autonomia ($N = 1$ dia) (CEPEL/CRESESB, 2014):

$$C_{Wh} = \frac{C_{correg} \times N}{DoD} = \frac{4159,3 Wh \times 1}{0,80} \approx 5199,1 Wh$$

$$C_{Ah} = \frac{CWh}{V_{cc}} = \frac{5199,1Wh}{48v} \approx 108,3 Ah$$

Com base no dimensionamento teórico, foi selecionada uma bateria estacionária de Lítio Ferro Fosfato (LiFePO4) da fabricante Unipower (modelo UPLFP48-100 3U), com capacidade nominal de 100 Ah, tensão nominal de 48 Vdc e capacidade de armazenamento de 4.800 Wh (4,8 kWh). A tecnologia LiFePO4 foi escolhida por apresentar vida útil elevada (6.000 ciclos a 80% DoD), alta eficiência de recarga (98%) e Sistema de Gerenciamento de Bateria (Battery Management System – BMS) integrado via protocolo MODBUS/RS485 (Unipower, 2024).

2.3 ESPECIFICAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DE POTÊNCIA E AUTOMAÇÃO

2.3.1 Inversor Híbrido Off-Grid

O gerenciamento da geração fotovoltaica, carregamento do banco de baterias e conversão estática CC/CA foi realizado por um inversor híbrido off-grid da fabricante SRNE (modelo HFP4850S80-145), com potência nominal de saída de 5.000 W e tensão de saída monofásica/bifásica de 230 Vca em 60 Hz (SRNE, 2024). O equipamento possui rastreador de ponto de máxima potência (MPPT) integrado, suportando até 4.400 Wp de entrada de painéis solares e corrente máxima de carga de 80 A. A imagem do inversor híbrido instalado no quadro do projeto é apresentada na Figura 5.

Figura 5. Inversor Híbrido SRNE HFP4850S80-145 de 5.000 W instalado no sistema.



Fonte: Autoria própria (2025)

2.3.2 Banco de Armazenamento e Inversor de Frequência

A Figura 6 apresenta a bateria de lítio Unipower UPLFP48-100 3U acoplada ao sistema elétrico.

Figura 6. Bateria estacionária de Lítio Ferro Fosfato (LiFePO4) Unipower UPLFP48-100 3U (48 V / 100 Ah).



Fonte: Autoria própria (2025)

Para acionar o motor trifásico do aerador de 1,0 CV a partir da saída bifásica/monofásica do inversor híbrido, integrou-se ao quadro um inversor de frequência WEG (modelo CFW500), exibido na Figura 7. O inversor de frequência desempenha três funções estratégicas:

1. **Conversão de fases:** transforma a rede de alimentação bifásica (220 Vca) em saída trifásica equilibrada (220 Vca) para o motor;
2. **Mitigação de picos de partida:** elimina a corrente de inrush inicial do motor através de uma rampa suave de aceleração;
3. **Otimização do consumo:** possibilita a variação da rotação e frequência do motor (ajustada experimentalmente em 45 Hz), reduzindo a demanda de potência ativa sem comprometer significativamente a movimentação da lâmina d'água.

Figura 7. Inversor de frequência WEG CFW500 instalado no quadro de comando e proteção.



Fonte: Autoria própria (2025)

Os parâmetros programados na IHM do inversor de frequência WEG CFW500, com base nos dados de placa do motor elétrico SEW, estão consolidados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de programação inseridos no inversor de frequência WEG CFW500.

Parâmetro	Descrição do Parâmetro	Ajuste Programado
P0135	Corrente Máxima de Saída	5,0 A
P0220	Seleção do Modo Local/Remoto	1 = Sempre Remoto
P0226	Seleção do Sentido de Giro	1 = Anti-horário
P0229	Modo de Parada do Motor	0 = Por Rampa
P0400	Tensão Nominal do Motor	220 V
P0401	Corrente Nominal do Motor	3,3 A
P0402	Velocidade Nominal do Motor	1751 RPM
P0403	Frequência Nominal do Motor	60 Hz
P0404	Potência Nominal do Motor	5 = 1,00 HP (0,75 kW)
P0407	Fator de Potência Nominal	0,70

Fonte: Weg (2024)

2.4 PROTEÇÕES ELÉTRICAS, AUTOMAÇÃO E ACIONAMENTO DA CARGA

O quadro de proteção e automação foi equipado com os seguintes componentes elétricos:

- **Dispositivo de Proteção contra Surtos (DPS):** Classe II para proteção do barramento CC contra descargas atmosféricas indiretas;
- **Seccionamento CC/CA:** Disjuntor termomagnético CC de 40 A entre a bateria e o inversor híbrido (cabos de 10mm²); disjuntor CC de 32 A no circuito dos painéis fotovoltaicos (cabos de 6mm²); e disjuntores CA de 10 A nas saídas e circuitos de controle (cabos de 2,5mm²);

- **Chave Seletora de 3 Posições (1/0/2):** Permite comutar a alimentação do inversor de frequência entre a fonte solar *off-grid* (posição 1), desligado (posição 0) e gerador auxiliar a combustível (posição 2);
- **Programador Horário Digital (Coel BWT40):** Automatiza o ciclo de aeração noturna, programado para emitir o sinal de partida ao inversor de frequência às 01h00min e a parada automática às 06h00min;
- **Monitoramento Térmico do Motor:** Instalação de um sensor de temperatura de contato na carcaça do motor elétrico SEW para monitorar o aquecimento estatórico durante a operação em frequência reduzida (45 Hz).

A Figura 8 ilustra o aerador chafariz de 1,0 CV em operação na superfície do viveiro de camarão no município de Nossa Senhora do Socorro.

Figura 8. Aerador chafariz de 1,0 CV instalado e em operação no viveiro de carcinicultura.



Fonte: Autoria própria (2025)

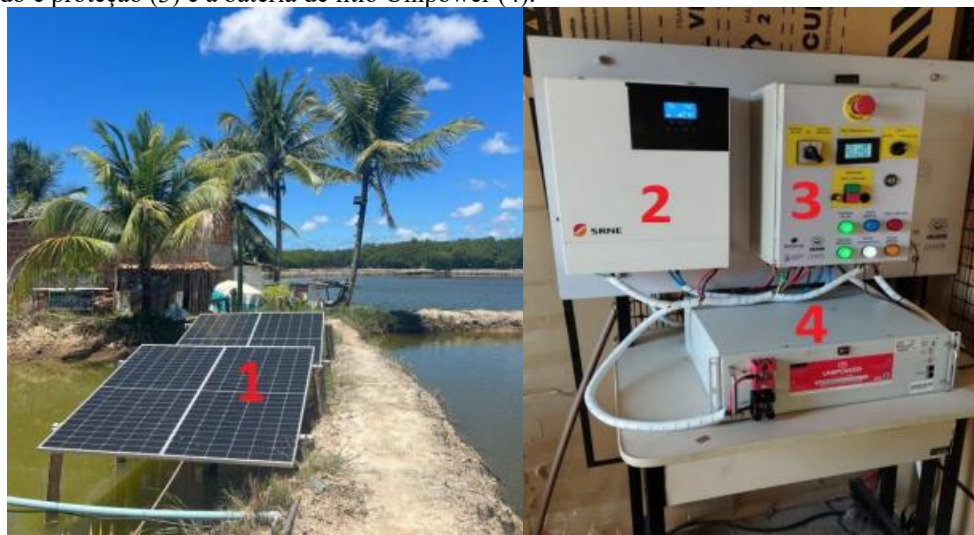
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos com a implementação do Sistema de Energia Solar Fotovoltaica Off-Grid (SESOG) em Nossa Senhora do Socorro (SE) foram apresentados e discutidos a seguir.

3.1 AVALIAÇÃO OPERACIONAL DO SISTEMA OFF-GRID E AUTONOMIA DO BANCO DE BATERIAS

A montagem completa do sistema e o arranjo final do quadro de comando, inversor híbrido e banco de baterias são exibidos na Figura 9.

Figura 9. Conjunto completo do Sistema Fotovoltaico Off-Grid (SESOG) montado, destacando o inversor híbrido SRNE (2), o quadro de comando e proteção (3) e a bateria de lítio Unipower (4).



Fonte: Autoria própria (2025).

Durante o período de testes de campo no viveiro de carcinicultura, o gerador fotovoltaico de 2.220 Wp demonstrou capacidade plena de recarga do banco de baterias de Lítio Ferro Fosfato (LiFePO₄) de 100 Ah (4,8 kWh) durante as horas de sol pleno (HSP = 5,42 kWh/m²/dia), atingindo o estado de carga completo (State of Charge – SOC = 100%) rotineiramente antes do final do período vespertino.

Contudo, nos ensaios de funcionamento noturno, observou-se uma divergência entre a autonomia estimada no dimensionamento teórico e a autonomia efetivamente verificada em campo. Enquanto os cálculos teóricos apontavam para uma autonomia de 5 horas de operação com profundidade de descarga de 80% (DoD = 80%), o sistema real manteve o acionamento contínuo do aerador por 4 horas, operando no intervalo compreendido entre as 01h00min e as 05h00min.

A Tabela 3 apresenta um comparativo síntese entre os parâmetros teóricos projetados e os resultados práticos mensurados durante os ensaios operacionais.

Tabela 3. Comparativo entre os parâmetros teóricos dimensionados e os resultados práticos observados em campo.

Parâmetro Avaliado	Valor Teórico	Valor Prático/Observado
Potência do Gerador FV	959,26 Wp (Mínima)	2.220 Wp (Instalada - 4 Módulos)
Capacidade do Banco de	108,3 Ah / 5,2 kWh	100 Ah / 4,8 kWh (1 Bateria LiFePO4)
Frequência de Operação do Motor	60 Hz (Nominal)	45 Hz (Ajustada via WEG CFW500)
Autonomia Noturna	5 horas	4 horas (01h00min às 05h00min)
Profundidade de Descarga (DoD)	80%	Atuação do corte por subtensão (47,2 V)
Diagnóstico de Autonomia	Adequado	Subdimensionado para o ciclo total

Fonte: Autoria própria (2025).

A redução da autonomia observada na prática (4 horas vs. 5 horas calculadas) decorre de fatores físicos e eletromecânicos acumulados ao longo da cadeia de conversão energética:

- 1. Eficiência Global da Cadeia de Conversão:** A conversão da energia química armazenada na bateria em trabalho mecânico no eixo do aerador envolve perdas térmicas no inversor híbrido SRNE (eficiência real $\approx 90\%$ a 92%), perdas por chaveamento semicondutor no inversor de frequência WEG CFW500 e perdas por efeito Joule nos condutores e conexões elétricas sob corrente contínua elevada;
- 2. Ponto de Corte por Subtensão (Corte de Proteção):** O inversor híbrido foi programado com o parâmetro de proteção contra subtensão ajustado em 47,2 V para desconexão automática da bateria. Essa margem de segurança impede a exaustão total das células de lítio, preservando sua vida útil (6.000 ciclos), porém interrompendo o suprimento no momento em que a tensão de patamar cai sob carga indutiva (SRNE, 2024; Unipower, 2024);
- 3. Subdimensionamento do Banco para o Ciclo Noturno Integral:** A carcinicultura exige aeração noturna crítica no período em que a taxa de respiração do ecossistema do viveiro atinge o pico negativo (geralmente entre 00h00min e 06h00min, totalizando 6 horas) (Cavalheiro et al., 2016). Assim, constatou-se que um banco composto por uma única bateria de 100 Ah (4,8 kWh) é **subdimensionado** para cobrir todo o ciclo crítico de anoxia sem suporte de uma segunda unidade de armazenamento.

3.2 COMPORTAMENTO ELETROMECHANICO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA E DO MOTOR A 45 HZ

A utilização do inversor de frequência WEG CFW500 mostrou-se uma solução técnica indispensável para a viabilização do sistema off-grid. O equipamento permitiu a conversão da alimentação bifásica/monofásica fornecida pelo inversor SRNE (230 Vca) em um sistema trifásico equilibrado (220 Vca) adequado para o motor SEW de 1,0 CV (WEG, 2024).

A operação do aerador em frequência reduzida de 45 Hz (em substituição à frequência nominal de 60 Hz) trouxe benefícios operacionais significativos:

- **Redução da Demanda de Potência Ativa:** Pelas leis de afinidade aplicadas a cargas centrifugas e axiais (como os aeradores chafariz), a potência consumida pelo motor varia proporcionalmente ao cubo da rotação. A redução da frequência de 60 Hz para 45 Hz (redução de 25% na velocidade angular) resultou em uma redução teórica superior a 40% na potência elétrica exigida, permitindo prolongar a autonomia da bateria (Villalva; Gazoli, 2012);
- **Eliminação da Corrente de Partida (Inrush):** A rampa de aceleração suave programada no parâmetro P0229 do inversor WEG evitou picos de corrente que superariam a capacidade instantânea do inversor híbrido, eliminando desarmes por sobrecorrente (WEG, 2024).

A operação do aerador chafariz de 1,0 CV promovendo a incorporação de oxigênio e a turbulência na superfície do viveiro em Nossa Senhora do Socorro é exibida na Figura 10.

Figura 10. Aerador chafariz de 1,0 CV em pleno funcionamento, promovendo a oxigenação e a mistura da lâmina d'água no viveiro de camarão



Fonte: Autoria própria (2025).

Em contrapartida, a operação prolongada de motores assíncronos em frequências inferiores à nominal reduz a eficiência do sistema de autoventilação acoplado ao eixo, o que poderia provocar sobreaquecimento estatórico. Para mitigar esse risco, o monitoramento térmico realizado via sensor de contato na carcaça do motor SEW registrou temperaturas operacionais estabilizadas abaixo de 55 °C, valor plenamente seguro perante o limite de isolamento térmico Classe F (155 °C) do equipamento.

3.3 ANÁLISE COMO TECNOLOGIA SOCIAL

A carcinicultura no estuário do Rio Sergipe é desenvolvida majoritariamente por pequenos produtores e empreendimentos familiares, cuja margem de lucro é severamente pressionada pelas tarifas de energia elétrica e pela vulnerabilidade a quedas na rede concessionária (Souza, 2022; Souza et al., 2022). Uma interrupção no fornecimento elétrico por poucas horas durante a madrugada pode resultar em mortalidade maciça por anoxia, dizimando meses de investimento (Cavalheiro et al., 2016; Despesca, 2023).

Como Tecnologia Social (TS) (Dagnino, 2010), o SESOG cumpre os requisitos essenciais de Adequação Sociotécnica (AST):

- **Emancipação e Autonomia:** Garante ao pequeno carcinicultor independência em relação à infraestrutura de energia convencional em áreas estuarinas isoladas de Nossa Senhora do Socorro (Dagnino, 2010);
- **Simplicidade Operacional e Automação:** A integração do programador horário Coel BWT40 e da chave seletora permite que o produtor opere o sistema de forma intuitiva, sem a necessidade de intervenções manuais durante a madrugada;
- **Sustentabilidade Ambiental:** Promove a descarbonização da produção aquícola ao evitar a emissão de gases de efeito estufa e a contaminação da água por resíduos de combustível fóssil decorrentes do uso de geradores motorizados (Dagnino, 2010; Simões et al., 2024).

4 CONCLUSÃO

O desenvolvimento e a avaliação de campo do Sistema de Energia Solar Fotovoltaica Off-Grid (SESOG) demonstraram a relevância socioeconômica do aproveitamento da energia solar para a aeração mecânica na carcinicultura de pequena escala no município de Nossa Senhora do Socorro (SE).

Os principais achados e contribuições deste trabalho sintetizam-se nos seguintes pontos:

1. **Desempenho da Geração e Armazenamento:** O gerador fotovoltaico de 2.220 Wp (4 módulos monocristalinos de 555 Wp em arranjo 2s2p) mostrou-se amplamente capaz de realizar a recarga completa do banco de baterias de Lítio Ferro Fosfato (LiFePO₄) de 100 Ah (4,8 kWh) durante o período diurno, aproveitando a elevada irradiação solar da região (HSP = 5,42 kWh/m²/dia);
2. **Autonomia Efetiva e Diagnóstico do Banco:** Nos ensaios noturnos, o sistema assegurou o funcionamento contínuo do aerador chafariz de 1,0 CV por 4 horas ininterruptas (das 01h00min às 05h00min). A divergência em relação à autonomia teórica projetada de 5 horas deveu-se às perdas de conversão acumuladas no inversor híbrido SRNE e no inversor de frequência WEG,

aliadas ao ponto de corte de proteção por subtensão (47,2 V) programado para preservar a vida útil da bateria de lítio (Unipower, 2024);

3. **Eficiência do Acionamento por Inversor de Frequência:** A conversão da alimentação bifásica para saída trifásica via inversor WEG CFW500, combinada ao ajuste operacional da frequência do motor para 45 Hz, reduziu a demanda de potência ativa em mais de 40% sem comprometer a dinâmica de incorporação de oxigênio no viveiro, mantendo a temperatura da carcaça do motor estabilizada abaixo de 55 °C (WEG, 2024);
4. **Recomendação Técnica de Expansão:** Para cobrir integralmente a janela crítica de anoxia noturna (das 00h00min às 06h00min, totalizando 6 horas), recomenda-se a expansão do banco com a adição de uma segunda unidade de bateria LiFePO4 de 100 Ah (alcançando 9,6 kWh de capacidade total), eliminando completamente o risco de mortandade do lote por déficits de oxigênio dissolvido;
5. **Impacto Socioeconômico e Tecnologia Social:** O projeto consolida-se como uma Tecnologia Social (TS) com potencial para pequenos produtores rurais (Dagnino, 2010), proporcionando autonomia energética, redução nos custos fixos operacionais e promoção da sustentabilidade ambiental na Bacia do Rio Sergipe (Despesca, 2023; Souza et al., 2022).

Como trabalhos futuros, sugere-se o monitoramento contínuo e automatizado dos parâmetros físico-químicos da água (oxigênio dissolvido, pH e temperatura) via sensores IoT integrados ao quadro solar, bem como a avaliação do ganho de biomassa e da taxa de sobrevivência do camarão *Litopenaeus vannamei* ao longo de ciclos produtivos completos acionados por energia renovável isolada.

REFERÊNCIAS

ARIAS, Romena de Aragón. **Carcinicultura**. Caderno Didático. Curitiba: e-Tec Brasil, Universidade Federal do Paraná, 2011. 170 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CRIADORES DE CAMARÃO (ABCC). **Carcinicultura em Sergipe**. Recife: Revista ABCC, ano 24, ed. especial, nov. 2022.

CAVALHEIRO, Alysson Corrêa et al. **Carcinicultura**. Caderno Didático. [S. l.: s. n.], 2016.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE S. BRITO (CRESESB). **Potencial Solar SunData**. Rio de Janeiro: CEPEL, 2024. Disponível em: <https://cresesb.cepel.br/index.php#data>. Acesso em: 16 out. 2026.

DAGNINO, Renato (org.). **Tecnologia social: ferramentas para construir outra sociedade**. 2. ed. rev. e ampl. Campinas: Komedi, 2010. 300 p.

DESPESCA. **Energia Solar na Aquicultura**: Calcule o Retorno do Investimento para se Livrar da Conta de Luz. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://despesca.com.br/investimento/energia-solar-na-aquicultura-calcule-retorno-investimento/>. Acesso em: 16 out. 2026.

GREENPEACE. **Solar Generation VI**: Solar photovoltaics power electricity for the world. Amsterdam: Greenpeace International, EPIA, 2011.

OLIVEIRA, Ianna Lucena Rocha de; MENEZES JÚNIOR, Raimundo Aprígio de; SILVA, Maria Cristina Basílio Crispim da; NASCIMENTO, Marcos Guedes do; SOUZA, Bruno César Bezerra Nóbrega de; GONÇALVES, Charlie Salvador; SANTOS, Marcos de Oliveira; SANTANA, Marcelo da Fonsêca; OLIVEIRA, Humberto da Silva; SIQUEIRA, Dallysson Vinicius Barros; QUEIROZ, Paulo Cesar Oliveira. Viabilidade energética solar e eólica de um sistema de tratamento e recirculação de água destinado à carcinicultura: estudo comparativo entre as cidades de Monteiro e Sousa – Paraíba – Brasil. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, Miami, v. 18, n. 10, e09287, p. 1-26, 2024.

RENESOLAR. **Datasheet Módulo Fotovoltaico RS6-555M-E3**: Especificação Técnica de Painel Solar Fotovoltaico 555W. São Paulo: Neosolar, 2024. Disponível em: https://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-555w-renesola-rs6-555m-e3.html?srltid=AU7gw4UvfavwwCs2MrZPJhvaYKf0r9cd0_ENUTXqFwP4M2Ed2DCefXMn. Acesso em: 16 out. 2026.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Dispositivo de Proteção contra Surtos (DPS)**: Manual Técnico e Especificações de Proteção CC/CA. [S. l.]: Schneider Electric, 2024.

SELESNAFES. **Com energia solar, criadores de camarão armazenam e aumentam produção**. Macapá: SelesNafes.com, 2023. Disponível em: <https://selesnafes.com/2022/08/com-energia-solar-criadores-de-camarao-armazenam-e-aumentam-producao/>. Acesso em: 16 out. 2026.

SOUZA, Bruno Barros de; JESUS, Janisson Batista de; CALDAS, Francis Luiz Santos; SANTOS, Marly Menezes. Mapeamento espaço-temporal da carcinicultura no litoral do estado de Sergipe, Brasil. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 23, n. 90, p. 179–192, dez. 2022.

SOUZA, Daniel Diógenes Holanda de. **Análise da viabilidade técnica de painéis solares fotovoltaicos conectados à rede em uma fazenda de produção de camarão em Alto Santo/CE**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) — Campus Russas, Universidade Federal do Ceará, Russas, 2022.

SRNE. **HFP Series Hybrid Solar Inverter User Manual**: HFP4850S80-145. Shenzhen: SRNE Solar Co., Ltd., 2024.

UNIPOWER. **Manual Técnico Bateria Estacionária de Lítio LFP UPLFP48-100 3U**. São Paulo: Unicoba Baterias, 2024.

VILLALVA, Marcelo Gradella; GAZOLI, Jonas Rafael. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2012. 224 p.

WEG. **Manual do Inversor de Frequência CFW500**: Guia de Programação e Parâmetros. Jaraguá do Sul: WEG Automação, 2024.